

インピーダンス整合の視点から見た共鳴方式の無線電力伝送

Effect of Impedance Matching on Efficiency of Wireless Power Transfer by Near-field Coupled Resonance

陳 強¹
Qiang Chen

小澤 和紘¹
Kazuhiro Ozawa

袁 巧微²
Qiaowei Yuan

澤谷 邦男¹
Kunio Sawaya

東北大学¹
Tohoku University

仙台高等専門学校²
Sendai National College of Technology

1 まえがき

電磁波による無線電力伝送は、遠方界の放射を用いた電磁放射方式 [1], [2], 極近傍界による電磁誘導方式 [3], [4], そして近傍界を利用した磁気共鳴方式 [5], [6] に分けられるとされている。磁気共鳴方式は、電磁誘導方式よりも遠距離伝送が可能でかつ電磁放射方式よりも高効率伝送が可能であるため、国内外で研究されている（例えば、[7] の参考文献等）。

本稿では、共鳴方式を用いた場合、最大の電力伝送効率を得るために、分布常数の伝送線路理論と電磁界の数値シミュレーションにより、送受信アンテナの負荷インピーダンスの整合と電力伝送効率の関係を考察する。

2 数値解析と考察

図 1 に示すような、送受信アンテナとして最も簡単な線状ダイポールアンテナを用いた無線電力伝送システムを考える。長 l のダイポールアンテナは、 d の間隔で、 z 軸と平行に置かれている。また、送信アンテナの内部抵抗を Z_s とし、受信アンテナの負荷インピーダンスを Z_l とする。

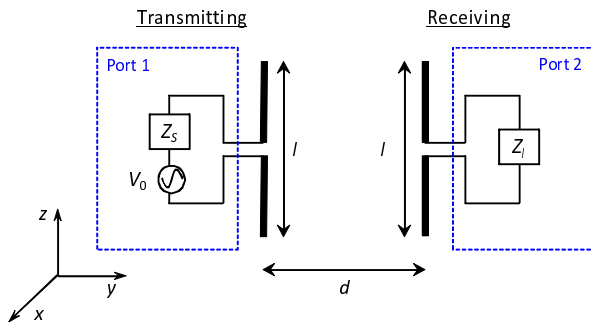


図 1 ダイポールアンテナを用いた無線電力伝送システム

電力伝送効率 η を以下の式で定義する。

$$\eta = \frac{P_l}{P_{in}} \quad (1)$$

ここで、 P_{in} は送信アンテナの入力電力、 P_l は受信アンテナの負荷による吸収電力であり、伝送電力である。

図 1 の無線電力伝送システムを図 2 に示すような 2 端子等価回路に置き換えることができ、この 2 端子回路の S パラメータを用いた電力伝送効率を次のように表現する。

$$\eta = \frac{P_l}{P_{in}} = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_l|^2)}{|1 - S_{22}\Gamma_l|^2 (1 - |\Gamma_{in}|^2)} \quad (2)$$

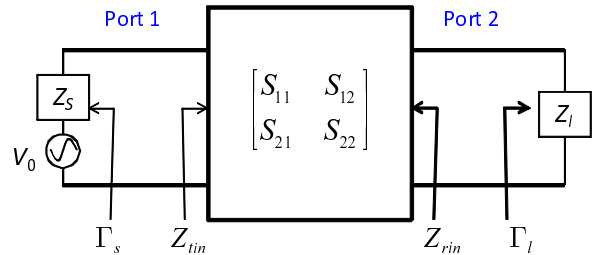


図 2 無線電力伝送システムの等価回路

ここで、 Γ_l は負荷 Z_l における反射係数、 Γ_{in} は回路のポート 1 を見た反射係数であり、それぞれ

$$\Gamma_l = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} \quad (3)$$

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_l}{1 - S_{22}\Gamma_l} \quad (4)$$

と定義される。ここでは、 S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22} はモーメント法によって計算される。また、 Z_0 は伝送線路の特性インピーダンス (50Ω) である。

式 (2) では、電力伝送効率 η は、負荷インピーダンス Z_l の関数となっているため、 η が最大値 η_{max} となるような負荷インピーダンス Z_{ol} を数学的に求めることができる。

以下に、ダイポール長 $l = 15\text{cm}$ 、間隔 $d = 3\text{cm}$ として、数値シミュレーションの結果を示し、考察を行う。

図 3 は最適負荷 Z_{ol} を取り付けたときに、電力伝送効率 η_{max} の周波数特性を示す。比較のため、 $Z_l = 10, 50, 100\Omega$ のときの電力伝送効率も同図にプロットされている。低周波領域、例えば 200MHz (アンテナ長 0.1 波長、距離 0.02 波長) 以下の領域では、送受信アンテナの放射電力は受信アンテナの負荷インピーダンスによる吸収電力 (伝送電力) と比べると無視できるため、 η_{max} がほぼ 100% となっている。周波数が高くなると、アンテナの放射電力が増加し、 η_{max} が減っていく。一方、最適負荷ではない $Z_l = 10, 50, 100\Omega$ のときに、電力伝送効率 η は、DC 付近では高いが、周波数が DC より少し高くなると急速に減少する。DC 付近は、電磁誘導方式を用いる周波数領域である。一方、 1000MHz 付近は、受信アンテナのインピーダンス整合により電力伝送効率が増加するため、電磁放射方式を用いる領域となる。

図 4 と図 5 では、最適負荷 Z_{ol} の実部、虚部の周波数特性と、最適負荷 Z_{ol} を取り付けた場合、送受信アンテナ

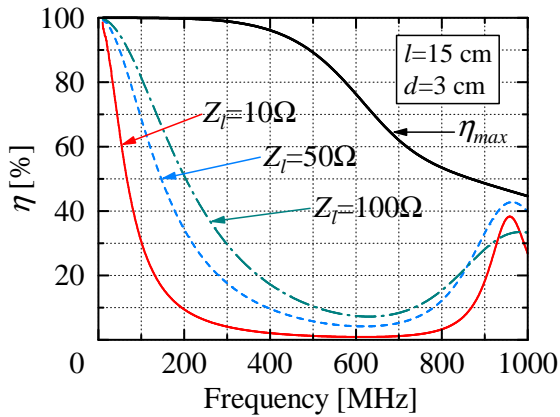


図3 最適負荷 Z_{ol} をつけたときの電力伝送効率 η_{max} の入力インピーダンスの共役 Z_{tin}^* , Z_{rin}^* の実部、虚部の周波数特性を比較する。伝送効率を最大化する最適負荷 Z_{ol} は、 $Z_{ol} = Z_{tin}^*$ を満たしていることが確認できる。ただし、 Z_{rin} は $Z_S = 50$ のため、 $Z_{rin} \neq Z_{tin}$ である。これらの結果とアンテナの対称性から、伝送効率を最大化する条件は送受信アンテナと送受信側の負荷インピーダンスとの共役整合であることが分かる。そのため、近傍界領域の「共鳴」方式による電力伝送は、送受信アンテナの相互結合を考慮した「インピーダンスの共役整合」条件を満たすことにより実現されると言える。

3 まとめ

本稿では、分布常数の伝送線路理論と電磁界の数値シミュレーションにより、無線電力伝送用の送受信アンテナの負荷インピーダンスの整合と電力伝送効率の関係を考察した。その結果、近傍界の共鳴方式による無線電力伝送は、送受信アンテナ間の相互結合を考慮したアンテナと負荷インピーダンスとの整合を行うことが条件であることがと分かった。

参考文献

- [1] W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 32, no. 9, pp. 1230-1242, Sep. 1984.
- [2] H. Matsumoto, "Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan," IEEE Microw. Mag., vol. 3, no. 4, pp. 36-45, Dec. 2002.
- [3] J. Murakami, F. Sato, T. Watanabe, H. Matsuki, S. Kikuchi, K. Harakaiwa, and T. Satoh, "Consideration on cordless power station- Contactless power transmission system," IEEE Trans. Magn., vol. 32, pp. 5017-5019, Sep. 1996.
- [4] K. Hatanaka, F. Sato, H. Matsuki, S. Kikuchi, J. Murakami, M. Kawase, and T. Satoh, "Power transmission of a desk with a cord-free power supply," IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 5, pp. 3329-3331, Sep. 2002.

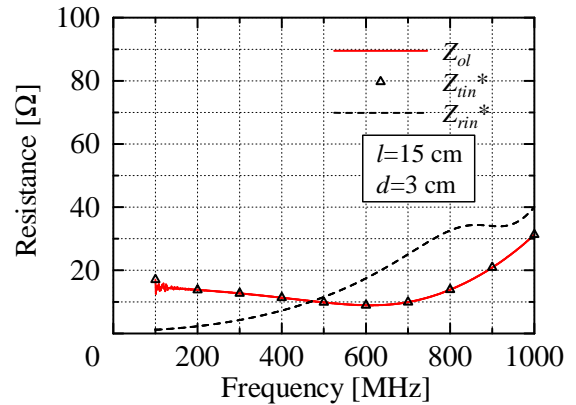


図4 最適負荷 Z_{ol} と送受信素子の入力インピーダンスの実部比較

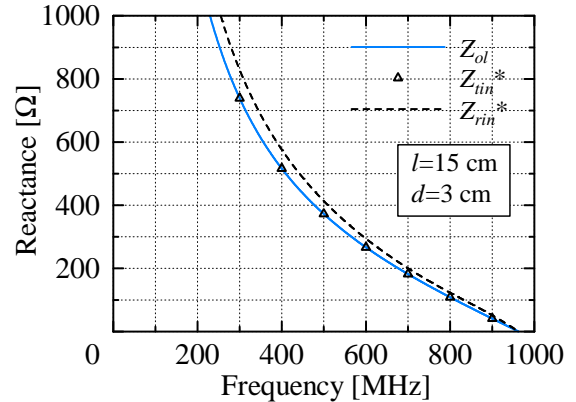


図5 最適負荷 Z_{ol} と送受信素子の入力インピーダンスの虚部比較

- [5] Andre Kurs, Arsteidis Karalis, Robert Moffatt, John Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science Magazine, Vol.317, No.5834, pp.83-86, 2007.
- [6] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," Ann. Phys., vol. 323, pp. 34-48, 2008.
- [7] 陳強, 小澤 和紘, 袁巧微, 澤谷邦男, "近傍無線電力伝送のアンテナ設計法についての検討," 第2回無線電力伝送時限研究専門委員会研究会, WPT2010-05, pp.6-9, 2010年10月.